

外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响

于肇端¹, 王丽娜¹, 曹辰兴^{1**}, 胡向阳^{2,3}

(1 山东农业大学 园艺与科学工程学院, 山东 泰安 271018; 2 中国科学院昆明植物研究所,
云南 昆明 650204; 3 中国科学院青藏高原研究所昆明部, 云南 昆明 650204)

摘要: 镉是植物生长的非必需元素, 它具有很大的生物毒性, 与其它重金属相比, 更易被植物吸收积累。通过采用营养液水培试验的方法, 研究了外源一氧化氮 (Nitric oxide, NO) 对不同浓度 Cd²⁺ (100 μmol L⁻¹, 300 μmol L⁻¹, 500 μmol L⁻¹) 胁迫下黄瓜幼苗生长、叶片光合特性以及活性氧代谢的影响。结果表明: 300 μmol L⁻¹ NO 供体硝普钠 (Sodium nitrop russide, SNP) 能显著缓解镉胁迫对黄瓜植株造成的伤害, 对 300 μmol L⁻¹ Cd²⁺ 处理的黄瓜幼苗缓解效果最好, 可提高幼苗的生长量, 增强幼苗叶片超氧物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性; 提高了叶片叶绿素和脯氨酸 (Pro) 含量; 降低了叶片丙二醛 (MDA) 含量。

关键词: 一氧化氮; 镉胁迫; 黄瓜幼苗; 光合作用; 活性氧

中图分类号: Q 945

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 2700 (2009) 06 - 486 - 07

The Effects of Exogenous Nitric Oxide on Growth, Active Oxygen Metabolism and Photosynthetic Characteristics in Cucumber (*Cucumis sativus*) Seedlings Under Cadmium Stress

YU Zhao-Duan¹, WANG Li-Na¹, CAO Chen-Xing^{1**}, HU Xiang-Yang^{2,3**}

(1 College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2 Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204, China; 3 Institute of Tibetan Plateau Research at Kunming, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204, China)

Abstract: Cadmium is a non-essential element for plant growth which has serious biological toxicity and comparing with other heavy metals, Cadmium is more prone to accumulate in plants. The present study was conducted in nutrient solution to investigate the effects of exogenous nitric oxide (NO) on growth of cucumber seedlings, photosynthetic characteristics and active oxygen metabolism in cucumber leaves under consistently different concentration of Cadmium stress (100 μmol L⁻¹, 300 μmol L⁻¹, 500 μmol L⁻¹). The results showed that 300 μmol L⁻¹ exogenous sodium nitrop russide (SNP), a nitric oxide donor, could significantly alleviate the injury to cucumber under Cadmium stress. The treatment of SNP showed the best results when cucumber under 300 μmol L⁻¹ Cd²⁺ stress, which increased the seedling growth, the activity of SOD, POD, and the content of photosynthetic pigment and proline. Moreover, exogenous nitric oxide markedly decreased the content of MDA under 300 μmol L⁻¹ Cd²⁺ stress.

Key words: Nitric oxide; Cd²⁺ stress; Cucumber seedling; Photosynthesis; Active oxygen

镉位于五毒 (Hg、Cd、Pb、Cr、As) 之首, 当镉污染蔬菜后, 容易通过食物链进入人体, 影响

基金项目: 国家自然基金项目 (30871704 与 30971452) 与中科院项目百人计划

通讯作者: Author for correspondence; E-mail: ccxsc@sdau.edu.cn; huxiangyang@mail.kib.ac.cn

收稿日期: 2009-08-11, 2009-10-19 接受发表

作者简介: 于肇端 (1983-) 女, 07 级硕士研究生, 主要研究内容为蔬菜育种及蔬菜生理。

人体健康。研究表明, Cd^{2+} 可诱导植物的自由基过氧化损伤, 加剧植物体内膜脂过氧化作用。重金属离子胁迫可诱导、影响这些酶的活性及其同工酶的变化, 从而反映出植物的受害状况。NO 是广泛分布于生物体中的一种重要的氧化还原信号分子, 属于活性氮 (reactive nitrogen species, RNS) 的范畴。NO 广泛存在于植物组织中, 并参与植物呼吸作用、光形态建成、种子萌发、衰老、对胁迫的响应细胞程序性死亡以及抗病防御反应等过程。王宪叶等 (2004) 首次发现外源 NO 预处理对小麦渗透胁迫造成的膜质过氧化有明显的缓解作用, 但 NO 对于镉胁迫下黄瓜生长影响及其机理未见相关报道。本实验以黄瓜为实验材料, 研究了外源一氧化氮对不同浓度镉 ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$, $300 \mu\text{mol L}^{-1}$, $500 \mu\text{mol L}^{-1}$) 胁迫下黄瓜幼苗生长及生理的影响, 旨在为缓解镉胁迫下黄瓜幼苗生长提供新的有效途径, 并初步探讨相关生理机制。

1 材料与方法

1.1 试材与处理

实验于 2008 年 5 月至 7 月在山东农业大学玻璃温室内进行。以黄瓜 (*Cucumis sativus L.*) 品种‘新泰密刺’为材料。种子在 28 恒温箱催芽 30 h 后, 播入装有基质的穴盘中育苗, 昼温 25~30, 夜温 16~20, 自然光照。在幼苗第二片真叶展开时, 选长势整齐一致的幼苗移入 8 L 水培箱中进行水培, 每小时通气 40 min。

营养液配方为: 大量: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.4 mol L^{-1} , KNO_3 0.5 mol L^{-1} , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 mol L^{-1} , KH_2PO_4 0.25 mol L^{-1} ; 微量: H_3BO_3 2.86 g L^{-1} , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.1893 g L^{-1} , $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.276 g L^{-1} , $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7 \cdot \text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.473 g L^{-1} , $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1.69 g L^{-1} , EDTA-FeNa 37.9899 g L^{-1} 。

1.1.1 硝普钠缓解镉胁迫实验 预培养 3 天后用不同浓度的 Cd^{2+} ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$, $300 \mu\text{mol L}^{-1}$, $500 \mu\text{mol L}^{-1}$) 处理, 同时在营养液中加入 NO 供体硝普钠 (Sodium nitroprusside, SNP) 处理, SNP 浓度设为 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$, 以单纯镉胁迫和正常营养液植株为对照, 处理一周左右后测定幼苗的生长指标。相关生理指标和光合参数测定设: 正常营养液培养 (CK)、 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ SNP、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ SNP、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ SNP。处理后, 待症状表现明显时进行拍照, 并进行各项生理指标的测定。为了保证处理浓度的稳定性, 处理期间 3 天更换一次营养液, 试验设 3 次重复。

1.1.2 抑制剂实验 预培养 3 天后用不同浓度的 Cd^{2+} ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$, $300 \mu\text{mol L}^{-1}$, $500 \mu\text{mol L}^{-1}$) 处理, 同时在营养液中加入抑制剂 1L - 硝基精氨酸 (Nitro-L-arginine) 和抑制剂 2 钨酸镁 (Magnesium tungstate-325 mesh) 处理, 两种抑制剂的浓度设为 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$, 以单纯镉胁迫和正常营养液植株为对照, 处理一周左右后测定两个幼苗的生长指标。相关生理指标和光合参数测定设: 正常营养液培养 (CK)、 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫、 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 1、 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 2、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 1、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 2、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 1、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 镉胁迫 + $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 抑制剂 2。处理后, 待症状表现明显时进行拍照, 并进行各项生理指标的测定。为了保证处理浓度的稳定性, 处理期间 3 天更换一次营养液, 实验设 3 次重复。

1.2 测定方法

1.2.1 干物质含量的测定 处理结束后, 将植株用自来水冲洗干净, 再用去离子水将植株冲洗 3 次, 用吸水纸吸干表面水分, 分成地上部、地下部, 杀青后, 80 烘干至恒重, 称量。

1.2.2 叶绿素含量的测定 采用丙酮提取液法测定叶绿素 a (chla)、叶绿素 b (chl b) 和类胡萝卜素 (car) 含量。

1.2.3 超氧化物岐化酶的测定 采用氮蓝四唑法 (NBT 法) 测定 SOD, 采用愈创木酚法测定过氧化物酶 POD, 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛 MDA, 采用水合茚酚酸酮法测定脯氨酸 (Pro)。

2 结果与分析

2.1 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

2.1.1 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗生长指标的影响 由图 1 可以看出, 镉胁迫下黄瓜

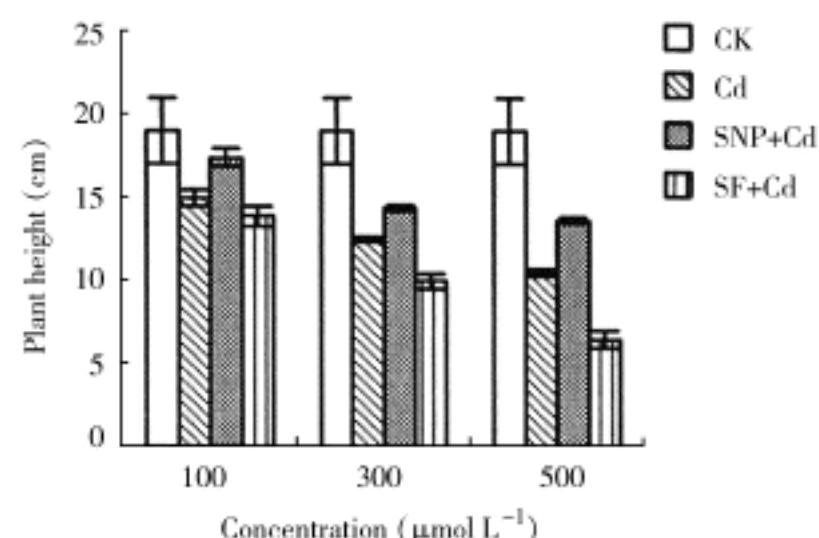


图 1 外源一氧化氮对镉胁迫黄瓜幼苗生长的影响

Fig. 1 Picture of exogenous nitric oxide on the growth of cucumber seedling under Cd^{2+} stress

幼苗的植株高度明显降低，而且随着镉离子浓度的增高，黄瓜植株高度逐渐降低，加入外源一氧化氮供体 SNP 后，黄瓜幼苗的高度明显增加，而加入铁氰化钾 (SF) 却没有明显变化。由此可以得出结论，随着镉离子浓度的增加，黄瓜幼苗受胁迫的程度越严重，而 SNP 能够缓解镉的胁迫。

2.1.2 外源一氧化氮对镉胁迫黄瓜幼苗叶片缓解的表现 图 3 显示，随着 Cd^{2+} 浓度增大，黄瓜叶片叶绿素总量呈下降趋势。镉胁迫下，

SNP 处理可以显著提高叶片中叶绿素含量。与对照 (CK) 相比，单独处理比加 SNP 处理，叶片叶绿素含量低；而比加铁氰化钾 (SF) 处理，叶片叶绿素含量高。说明 SNP 释放的 NO 对镉胁迫有一定的缓解作用。

由图 4 可以看出，向处理后的黄瓜幼苗中加入抑制剂，发现黄瓜幼苗的叶绿素含量下降，且低于对照，与图 2 中的 SNP 处理相结合进行比较，说明抑制剂的处理加剧了叶片叶绿素含量的



图 2 外源一氧化氮对镉胁迫黄瓜幼苗叶片缓解的照片

Fig. 2 Picture of exogenous nitric oxide in leaves of cucumber seedling under Cd^{2+} stress

1. $\text{Cd}^{2+} 100 \mu\text{mol L}^{-1}$; 2. $\text{Cd}^{2+} 300 \mu\text{mol L}^{-1}$; 3. $\text{Cd}^{2+} 500 \mu\text{mol L}^{-1}$; 4. $\text{SNP}300 + 100 \mu\text{mol L}^{-1}$;
5. $\text{SNP}300 + 300 \mu\text{mol L}^{-1}$; 6. $\text{SNP}300 + 500 \mu\text{mol L}^{-1}$

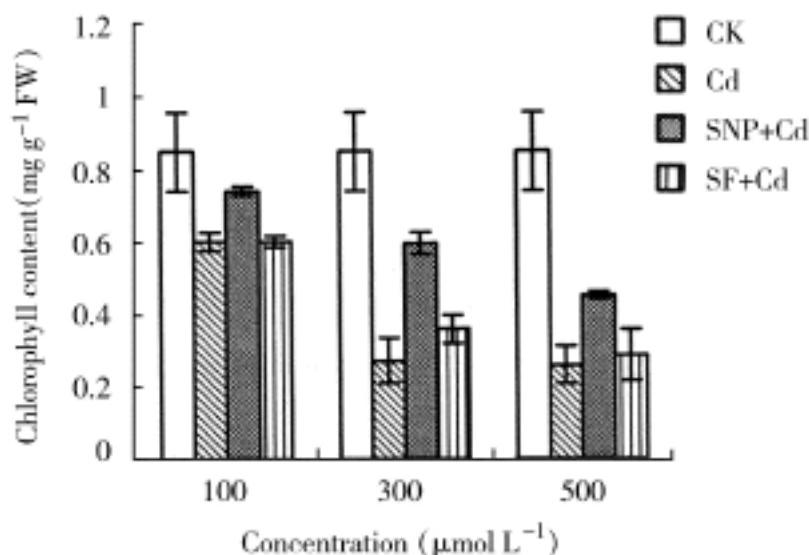


图3 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of exogenous nitric oxide on the chlorophyll content in leaves of cucumber seedling under Cd²⁺ stress

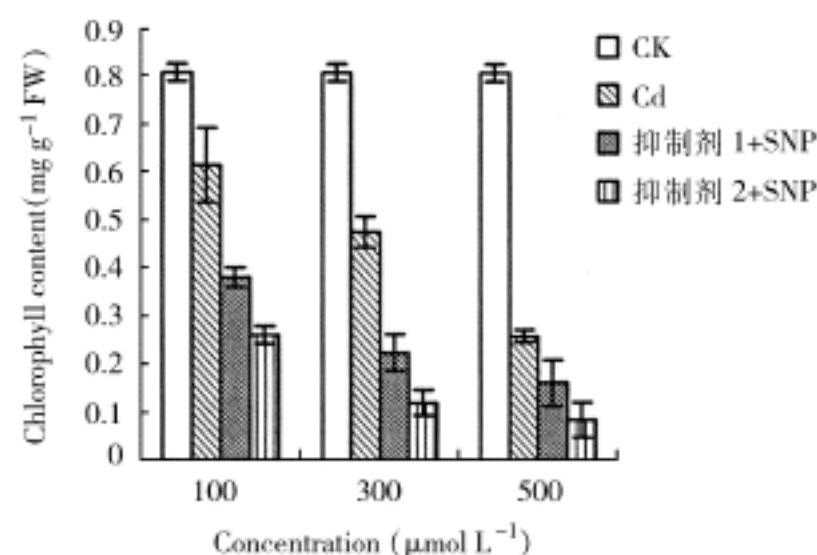


图4 抑制剂对外源一氧化氮缓解的镉胁迫下黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of exogenous nitric oxide on the chlorophyll content in leaves of cucumber seedling under inhibitor stress

降低，同时，从这一方面，可以看出 SNP 对镉胁迫的缓解作用。

2.2 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

2.3 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片 SOD 的影响

超氧化物歧化酶 (SOD) 能把 O₂^{·-} 歧化为 H₂O₂，是植物体内重要的抗氧化酶之一。由图 5 可知，镉胁迫使 SOD 活性显著降低。加入 SNP 处理后，SOD 活性增加，而加入 SF 基本上不能增加 SOD 的活性。

2.4 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片 POD 的影响

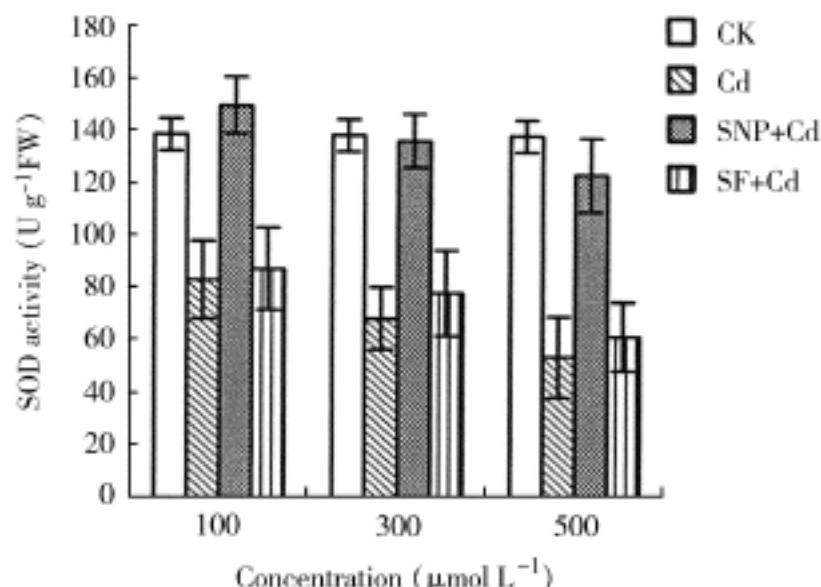


图5 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effects of exogenous nitric oxide on SOD in leaves of cucumber seedling under Cd²⁺ stress

POD 是一种含 Fe 的金属蛋白质，其作用如同氢的受体，在植物呼吸代谢中起着重要作用。从图 6 可见，镉胁迫后，POD 活性均有不同程度的升高，随着镉浓度的增加，其上升趋势减缓，100 μmol L⁻¹ 镉浓度处理的升幅最大。经硝普钠的缓解后，POD 活性都有明显的降低，由此可看出其显著的缓解效果。而铁氰化钾则没有较显著的缓解效果。而从图 7 可见，镉浓度 100 μmol L⁻¹ 处理时叶片体内 POD 含量明显增加；但镉浓度为 300 μmol L⁻¹ 和 500 μmol L⁻¹ 时，明显抑制了其活性；进行抑制剂处理后，叶片内 POD 含量增加迅速，与图 6 相结合进行比较，发现 SNP 处理能显著降低叶片 POD 含量，由此也可以看出

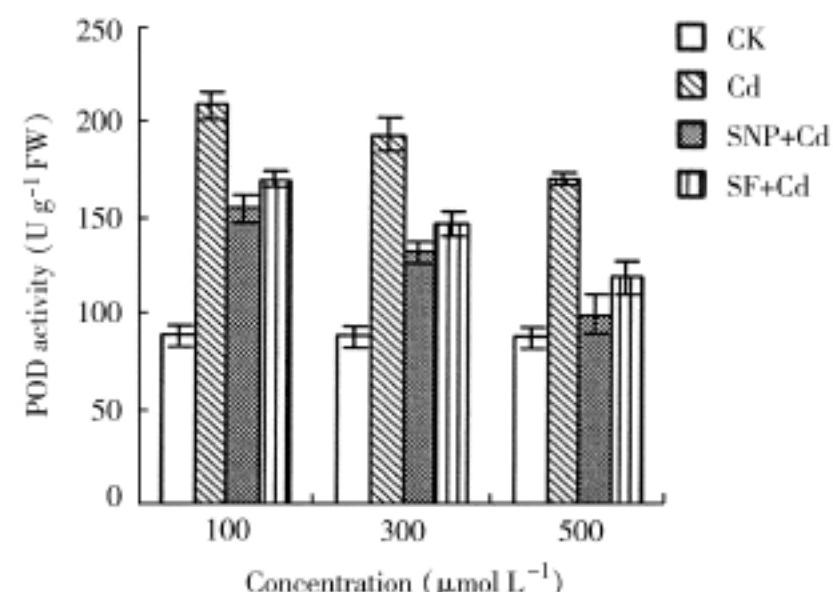


图6 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片 POD 活性的影响

Fig. 6 Effects of exogenous nitric oxide on POD in leaves of cucumber seedling under Cd²⁺ stress

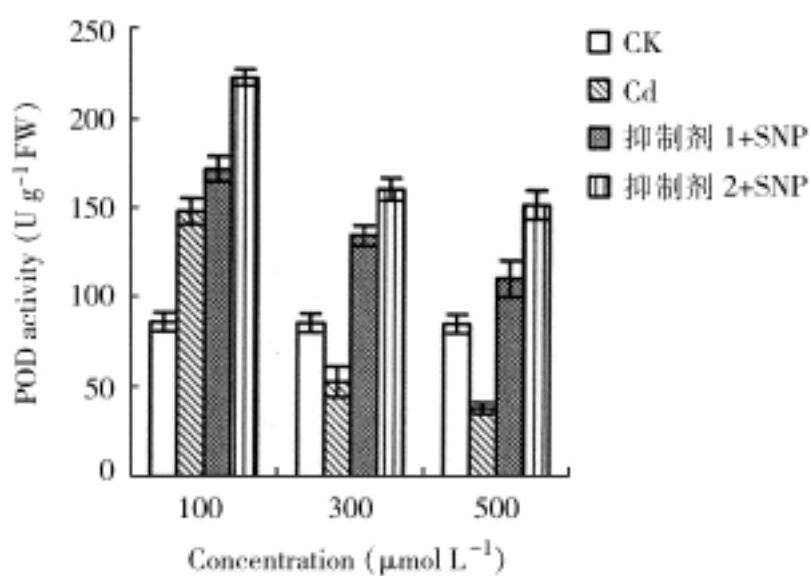


图 7 抑制剂对外源一氧化氮缓解的镉胁迫下黄瓜幼苗 POD 含量的影响

Fig. 7 Effects of exogenous nitric oxide on POD in leaves of cucumber seedling under inhibitor stress

的膜脂过氧化作用的缓解是很显著的。

2.6 外源 NO 对镉胁迫下叶片脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物体内的一种重要的渗透调节物质和抗氧化物质。在盐胁迫下植物积累脯氨酸具有一定普遍性 (樊怀福等, 2007)。

图 10 表明, 镉胁迫处理后, 叶片内脯氨酸含量明显增加, 以后持续增加, 与正常栽培的黄瓜幼苗间有显著性差异; 硝普钠处理后, 进一步促进了脯氨酸的积累。正常栽培的黄瓜幼苗叶片的 Pro 含量一直维持在较低水平。而图 11 表明, 镉胁迫下, 叶片体内 Pro 含量明显增加, 显著性差异; 进行抑制剂处理后, 叶片内 Pro 含量增加迅速, 与图 10 相结合进行比较, 发现其叶片内 Pro 含量均高于其他处理, 由此也可以看出 SNP 对镉胁迫的缓解作用是显著的。

3 讨论

镉胁迫对植物的伤害是多方面的。它能诱导活性氧的产生, 导致膜质过氧化和生物大分子的损伤, 从而使光合作用等生理过程发生紊乱, 抑制植株的生长 (梁芳和郭晋平, 2007)。本试验结果显示: 正常条件下的黄瓜幼苗 (CK) 植株高度为 19.03 cm, 镉胁迫后, 黄瓜幼苗植株高度有明显的降低 (Cd^{2+} 浓度为 $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $500 \mu\text{mol L}^{-1}$ 时, 植株平均高度分别为 15.0 cm、12.5 cm、10.54 cm), 从而可以看出镉胁迫对黄瓜幼苗的伤害。

SNP 对镉胁迫的缓解是很显著的。

2.5 外源 NO 对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片 MDA 含量的影响

图 8 表明, 随着镉离子浓度的增大, MDA 含量逐渐增加, 说明植物细胞受到的伤害逐渐增大, 用硝普钠缓解处理后, 黄瓜幼苗根部显著缓解了叶片 MDA 的积累, 表明 NO 可以缓解由于镉胁迫造成的膜脂过氧化作用。而同样, 铁氰化钾 SF 没有明显的缓解效果。而图 9 表明, 镉胁迫下, 叶片的 MDA 含量明显增加; 进行抑制剂处理后, 叶片内 MDA 含量增加迅速, 与图 8 相结合进行比较, 发现 SNP 处理能显著降低叶片 MDA 含量, 由此也可以看出 SNP 对镉胁迫造成

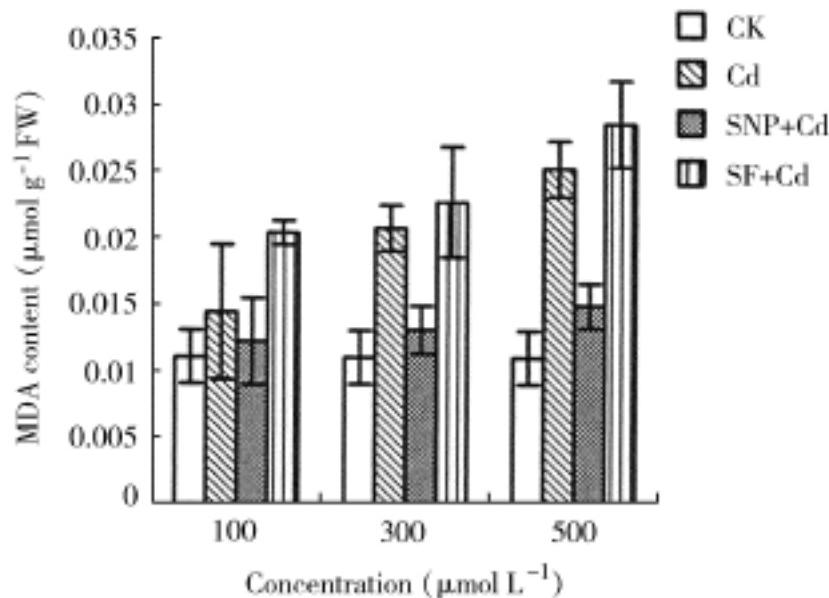


图 8 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片 MDA 含量的影响

Fig. 8 Effects of exogenous nitric oxide on MDA in leaves of cucumber seedling under Cd^{2+} stress

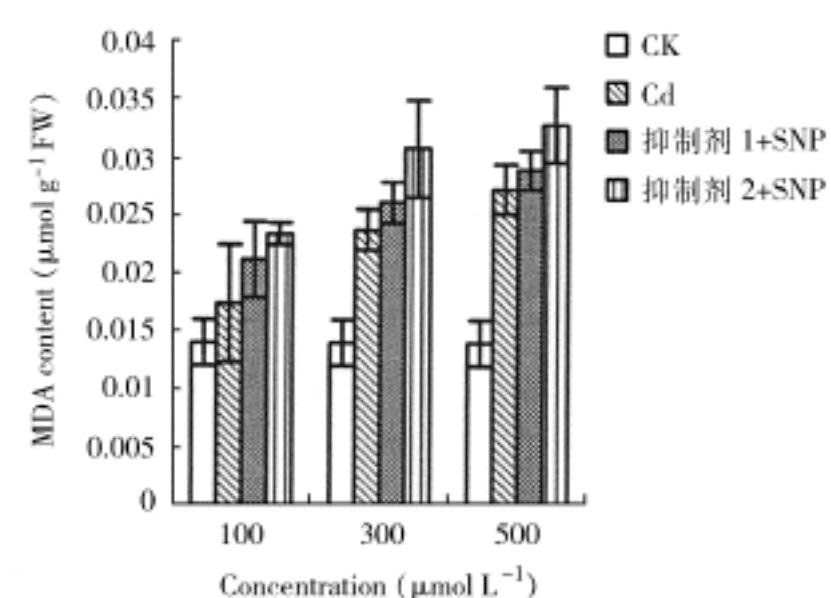


图 9 抑制剂对外源一氧化氮缓解的镉胁迫下黄瓜幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 9 Effects of exogenous nitric oxide on MDA in leaves of cucumber seedling under inhibitor stress

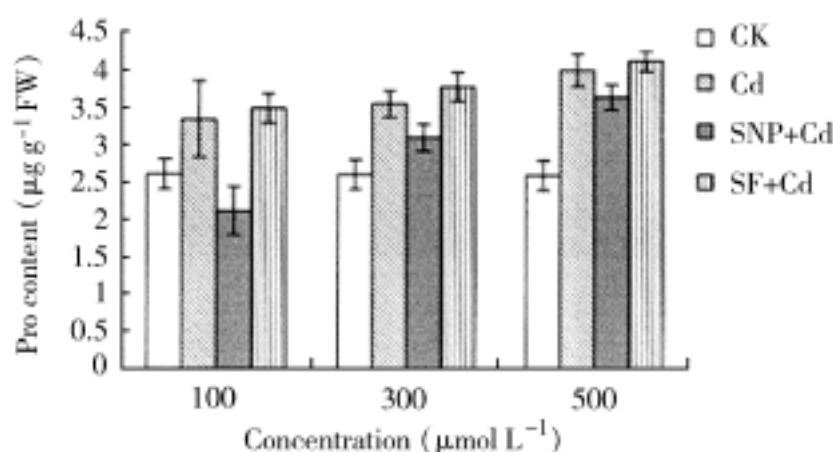


图 10 外源一氧化氮对镉胁迫下黄瓜幼苗叶片脯氨酸含量的影响

Fig. 10 Effects of exogenous nitric oxide on Pro in leaves of cucumber seedling under Cd^{2+} stress

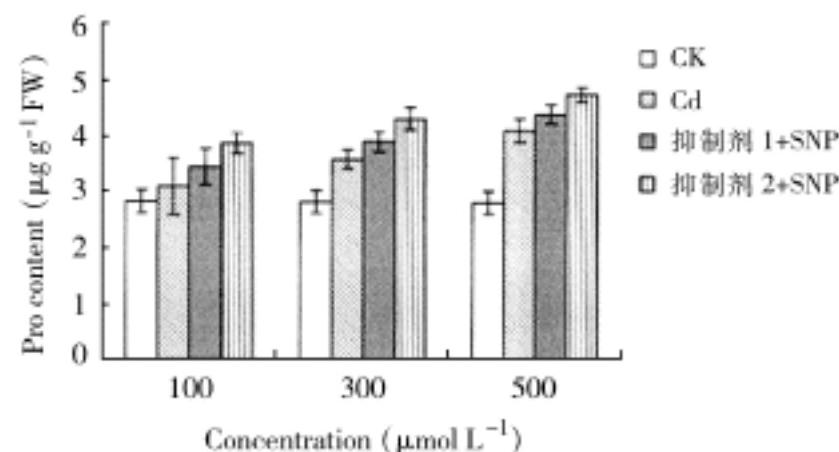


图 11 抑制剂对外源一氧化氮缓解的镉胁迫下黄瓜幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 11 Effects of exogenous nitric oxide on Pro in leaves of cucumber seedling under inhibitor stress

另外有研究表明, 镉胁迫能损伤主要的生物大分子, 增加膜脂过氧化作用, 抑制超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 的活性 (樊怀福等, 2007)。也有研究认为, 镉可能是直接取代这些酶活性中心的金属元素或与酶的半胱氨酸残基结合, 从而抑制这些酶的活性 (杨居荣等, 1995)。本试验的研究结果表明, 镉胁迫下, 黄瓜幼苗体内活性氧自由基增多, 诱导了体内 SOD、POD 的合成, 其活性增强是氧自由基诱导的结果, 表明了它们在黄瓜幼苗抗镉胁迫方面的协同性, 共同组成防御过氧化系统。镉胁迫使黄瓜幼苗的叶绿素含量显著降低, 有研究证实渗透胁迫下叶绿素的降解主要由活性氧的氧化损伤引起 (蒋明义等, 1994), 从某一方面说, 镉胁迫下黄瓜幼苗叶绿素含量的降低, 缓解了镉对黄瓜幼苗的伤害。镉胁迫下黄瓜幼苗脯氨酸含量下降, 其抗氧化能力降低, 从而使黄瓜幼苗受到极大伤害。

一氧化氮 (nitric oxide, NO) 是生物体内一种重要的信号分子 (Delledonne 等, 2003), 胁迫能够诱导植物 NO 的产生, NO 也能够触发细胞的防御反应 (Neill 等, 2003; Delledonne 等, 2003)。许多研究表明, NO 能缓解盐胁迫对水稻伤害作用 (Akio Uchida 等, 2002), 也能缓解镉胁迫对玉米和向日葵叶片以及羽扇豆根系的毒害作用 (Kopyra and Gwózdz, 2003) 的伤害等。

本试验研究结果表明, SNP 的处理能明显减轻重金属镉胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制, 这与 Zhang 等 (2004) 对玉米的研究结果相一致。SNP

处理不同程度地提高了镉胁迫下黄瓜幼苗根系抗氧化酶活性, 显著降低了根系 O_2^- 产生速率、细胞膜的离子渗漏和 MDA 含量, 而其降解主要副产物 NO_2^- 没有这种效果和不良副作用。植物细胞质膜是盐胁迫对植物伤害最敏感的部位和原初位点 (刘开力等, 2005)。SOD 是一种诱导酶, 镉胁迫促进 O_2^- 生成, 诱导 SOD 活性明显升高。外源 NO 处理后, SOD 活性进一步明显增加。镉胁迫初期根中活性氧清除酶暂时升高, 可能是黄瓜幼苗对镉胁迫的应激反应之一。外源 NO 对 SOD、POD 活性的明显促进作用, 提高了清除自由基防御系统的防御能力, 缓解了镉胁迫对黄瓜幼苗的氧化伤害作用。脯氨酸能提高黄瓜幼苗的抗氧化能力, 外源 NO 能促进低温胁迫下黑麦草 Pro 的积累, 提高抗冷性 (马向丽等, 2005); 也可提高盐胁迫下小麦叶片中的 Pro 含量, 增强耐盐性 (陈明等, 2004)。本试验结果也表明, 外源 NO 能促进镉胁迫下黄瓜幼苗 Pro 的积累, 这可能是缓解镉胁迫下黄瓜幼苗伤害的另一重要原因。

添加抑制剂 (L-硝基精氨酸和钨酸镁), 抑制了黄瓜幼苗的内源一氧化氮, 从而使幼苗的敏感性增加。降低了清除自由基防御系统的防御能力, 加重了镉对黄瓜幼苗的氧化伤害。从这一方面看, SNP 对镉胁迫下黄瓜幼苗的缓解是有作用的。

综上所述, 外源 NO 能够提高黄瓜植株根系抗氧化酶的活性, 提高了清除自由基防御系统的防御能力, 缓解镉胁迫对黄瓜幼苗的氧化伤害作

用, 从而提高植株耐镉性, 显著缓解镉胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制作用。添加抑制剂的试验, 进一步说明了 SNP 对镉胁迫的缓解作用。

由于 NO 具有明显的剂量和时间效应, 随着植物种类和镉胁迫条件的不同, NO 作用浓度也必将发生相应的变化, 但 NO 在植物逆境响应中的作用是毫无疑问的。

[参 考 文 献]

- Akio U, Andre TJ, Takashi H *et al.*, 2002 . Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice [J] . *Plant Science*, 163: 515—523
- Chen M (陈明), Shen WB (沈文飚), Ruan HH (阮海华) *et al.*, 2004 . Effects of extraneous nitric oxide donor SNP in modulating root growth and oxidative damage in wheat seedling under salt stress [J] . *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 30 (5): 569—576
- Delledonne M, Xia YJ, Dioxin RA, 1998 . Nitric oxide function as a signal in plant disease resistance [J] . *Nature*, 394 (6693): 585—588
- Fan HF (樊怀福), Guo SR (郭世荣), Zhang RH (张润花) *et al.*, 2007 . Effects of extraneous nitric oxide on plant growth, and root Membrane lipid peroxidation of cucumber seedlings under NaCl stress [J] . *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 23 (1): 63—67
- Jiang MY (蒋明义), Yang WY (杨文英), Xu J (徐江) *et al.*, 1994 . Active oxygen damage effect of chlorophyll degradation in rice seedlings under osmotic stress [J] . *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 36 (4): 289—295
- Kopyra M, Gwozdz EA, 2003 . Nitric oxide stimulates seeds germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus* [J] . *Plant Physiology and Biochemistry*, 41: 1011—1017
- Liang F (梁芳), Guo JP (郭晋平), 2007 . The progress of researches on heavy metal tolerance in plants [J] . *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences* (山西农业科学), 35 (11): 56—61
- Li LL (刘开力), Han HR (韩航如), Xu YH (徐颖洁) *et al.*, 2005 . Mitigative effect of extraneous nitric oxide on lipid peroxide of rice root [J] . *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 19 (4): 333—337
- Ma XL (马向丽), Wei XH (魏小红), Long RJ (龙瑞军) *et al.*, 2005 . Studies on mechanism of enhancing the chilling resistance of annual ryegrass by exogenous nitric oxide [J] . *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25 (6): 1269—1274
- Neill SJL, Desikan R, Clarke A *et al.*, 2002 . Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signal in stomatal guard cells [J] . *Plant Physiology*, 128: 13—16
- Wang XY (王宪叶), Shen WB (沈文飚), Xu LL (徐朗莱), 2004 . Exogenous nitric oxide alleviates osmotic stress-induced membrane lipid peroxidation in wheat seedling leaves [J] . *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 30 (2): 195—200
- Yang JR (杨居荣), He JQ (贺建群), Zhang GX (张国祥) *et al.*, 1995 . Exploration of tolerance mechanism of crops to Cd pollution [J] . *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 6 (1): 87—91
- Zhang YY, Liu YL, 2004 . Source and function of nitric oxide in plants [J] . *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 24 (5): 921—929